

О применении высокопористых алюминиевых сплавов и сотовых конструкций в посадочных устройствах космических аппаратов

© В.А. Марков, Ю.В. Попов, В.И. Пусев, В.В. Селиванов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлены результаты исследований механических свойств и амортизирующих характеристик высокопористых алюминиевых сплавов и сотовых конструкций из алюминиевых сплавов, имеющих начальную среднюю плотность от 190 до 2250 кг/м³. Исследование основано на данных зарубежных публикаций и экспериментальных результатах, полученных авторами. Приведены диаграммы деформирования, иллюстрирующие характерные стадии процесса деформирования и уплотнения высокопористых сплавов и сотовых конструкций из алюминиевых сплавов. Установлены высокопористые сплавы, диаграмма деформирования которых близка к идеализированной. Показано на основе анализа экспериментальных данных наличие двух групп материалов: первые имеют диаграмму деформирования без упрочнения на стадии уплотнения, а вторые — с упрочнением. Приведены основы расчета удельной и эффективной энергии поглощения удара. Показаны аналоги-амортизаторы для характерных стадий диаграмм деформирования. Предложено применение эффективной энергии поглощения удара как критерия для сравнения амортизаторов удара между собой. Полученные результаты могут быть использованы при разработке однократных амортизаторов удара.

Ключевые слова: космический аппарат, посадочное устройство, амортизатор удара, высокопористый алюминий, сотовая конструкция

Введение. Цель работы — выработка критериев для сравнения амортизаторов удара и установление параметров, оказывающих существенное влияние на механические свойства высокопористых структур. Для этого был проведен анализ диаграмм деформирования высокопористых алюминиевых сплавов и сотовых конструкций на основе алюминиевых сплавов, а также предложены идеализированные диаграммы деформирования без упрочнения и с упрочнением. Исследование проводилось на основе данных из публикаций зарубежных коллег и результатов, полученных в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Представленная работа является актуальной, так как однократные амортизаторы удара широко применяются в автомобильном и железнодорожном транспорте, ракетно-космической технике, а также в контейнерах для радиоактивных отходов. В посадочных устройствах (ПУ) и других элементах космических аппаратов (КА) в качестве однократных амортизаторов удара используются пенопласты и сотовые конструкции из металлов [1]. Так, в отечественных ПУ КА «Марс-3» и «Марс-6» [1] был использован пенопласт, в американских КА были

установлены сотовые конструкции [2, 3]. Посадочные устройства американских КА типа Surveyor (7 ед.) для посадки на Луну [2] имели стойки с амортизаторами самолетного типа [3]. Тарельчатые опоры изготавливали из алюминиевых сот, а к нижней части каркаса аппарата прикрепляли дополнительные блоки из алюминиевых сот (рис. 1) для смягчения удара о грунт в момент прогиба основных опор [4, 5]. Сотовые блоки использовали [6, 7] для амортизации ударных нагрузок в телескопических стойках ПУ лунных кабин (модулей) американских КА типа Apollo (6 ед.) [2]. Аналогичные ПУ применяли в американских КА типа Viking (2 ед.) [2], предназначенных для исследования Марса.

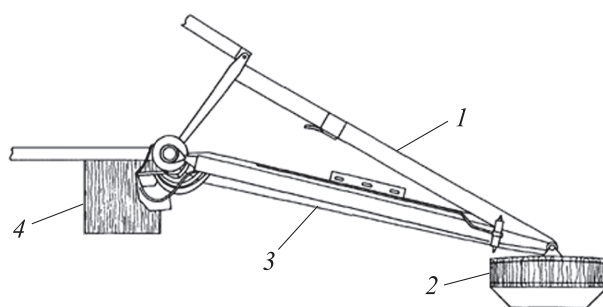


Рис. 1. Опора ПУ КА типа Surveyor (США):

1 — амортизатор удара; 2 — пята; 3 — посадочная опора; 4 — сотовый блок

Механические свойства алюминиевых пен и ячеистого алюминия. Следует отметить, что пористые металлы применяли в научно-исследовательских целях еще в 1950-х годах для изучения свойств металлов при высоких ударно-волновых давлениях — до 2 ТПа [8]. На важность этих исследований впервые обратил внимание академик Я.Б. Зельдович в 1957 г. [8, 9]. Практически в это же время были предприняты попытки производства и применения в авиаракетной и космической технике пористого алюминия, получаемого на основе вспенивания самого алюминия и его сплавов (пеноалюминий) [10–12]. Однако технологии вспенивания в то время не позволяли обеспечить стабильную структуру и, следовательно, необходимые механические свойства пеноалюминия. Это привело к широкому использованию в авиаракетной и космической технике сотовых конструкций из алюминиевых сплавов.

В последние годы интерес к пористым металлам существенно возрос, о чем может свидетельствовать проведение со второй половины 1990-х годов регулярных европейских конференций, а с 1999 г. — регулярных (каждые два года) международных конференций по проблемам производства, машиностроительным технологиям и фундаментальным соотношениям между структурой и свойствами ячеистых металлов и пенометаллов [13] (сокращенно — MetFoam). В работе [13]

отмечено, что повышенный интерес к пористым металлам объясняется не только совершенствованием технологий их получения, но и высокими требованиями к современным машинам в различных областях, в том числе к любым транспортным средствам, в связи с возрастанием требований к безопасности и т. д. Кроме того, в [13] указано, что наибольшее число работ связано с ячеистыми металлами и пенометаллами на основе алюминия и алюминиевых сплавов.

В соответствии с данными, приведенными в [14], которые основаны на анализе работ по пористым средам, к высокопористым металлам можно отнести металлы, имеющие начальную пористость α_0 в диапазоне значений от 1,2 до 8,0, а сама начальная пористость определена как частное от деления величины плотности материала матрицы (твердой фазы, сплошного или компактного материала) на величину начальной средней плотности (кажущейся плотности) пористой среды ρ_0 . Металлы с начальной пористостью 8,0...20,0 относят к сверхпористым [8, 14].

В большинстве случаев механические характеристики высокопористых металлов, в том числе и на основе алюминиевых сплавов, получают при проведении испытаний на сжатие при упругопластических деформациях и деформациях пластического уплотнения. Диаграммы деформирования пеноалюминия Альтаг 35 (рис. 2) [12] и высокопористых алюминиевых сплавов, полученных с помощью других технологий, имеют характерные стадии (этапы), которые в ряде работ представлены идеализированными диаграммами деформирования (рис. 3) [14–16].

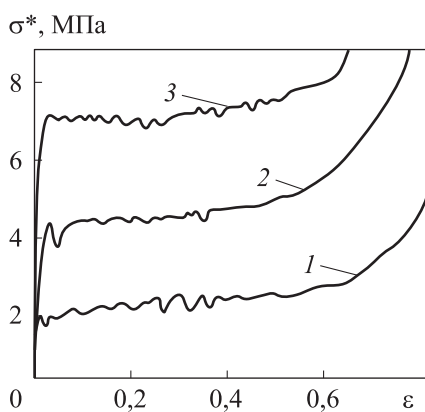


Рис. 2. Диаграммы деформирования пеноалюминия Альтаг 35:

1 — $\rho_0 = 190 \text{ кг/м}^3$ ($\alpha_0 = 14, 21$);

2 — $\rho_0 = 240 \text{ кг/м}^3$ ($\alpha_0 = 11, 25$);

3 — $\rho_0 = 320 \text{ кг/м}^3$ ($\alpha_0 = 8, 4$)

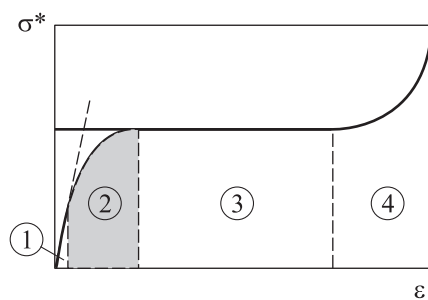


Рис. 3. Идеализированная диаграмма деформирования:

σ^* — эффективное напряжение; ϵ — деформация; 1 — линейная упругая стадия; 2 — нелинейная упругая стадия (переходная стадия); 3 — уплотнительно-пластическая стадия; 4 — пластическая стадия

Некоторые высокопористые и сверхпористые алюминиевые сплавы имеют диаграммы деформирования, близкие к идеализированной диаграмме в диапазоне начальной пористости α_0 от 2,3 до 3,06 [17, 18], от 3,7 до 7,1 [19], от 4,6 до 7,7 [20], от 11,3 до 12 [21, 22] (рис. 4, а–в).

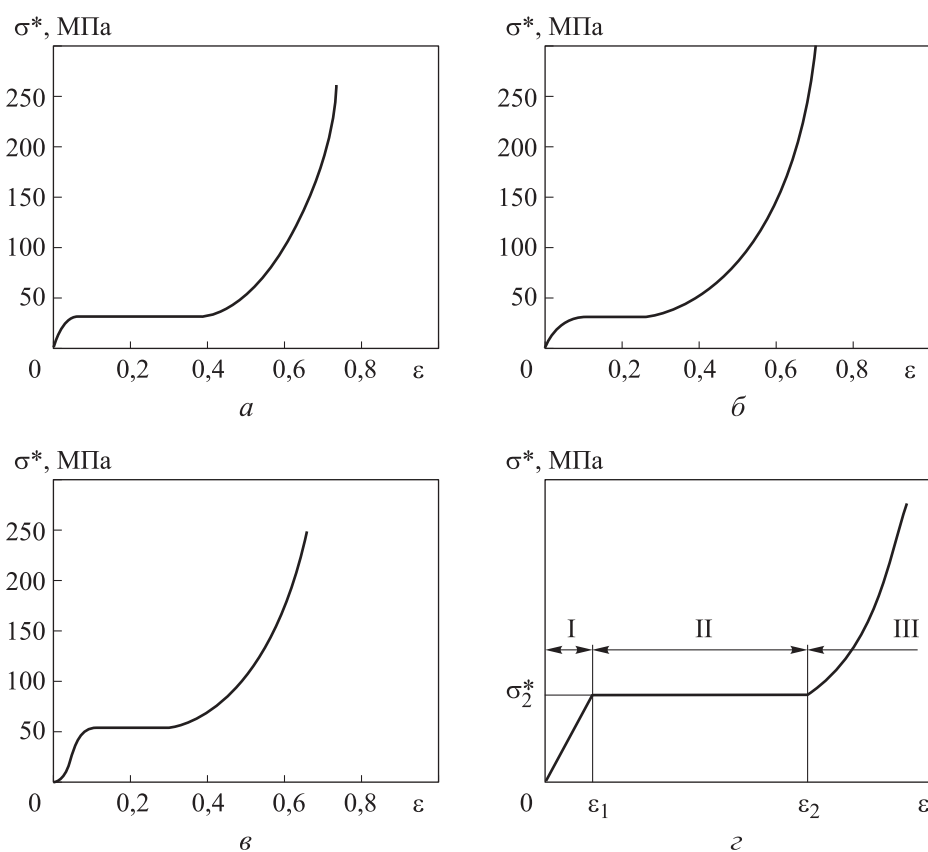


Рис. 4. Диаграммы деформирования образцов ячеистого алюминия (а–в) и идеализированная диаграмма деформирования (з):

а — образцы со сферическими порами диаметром 6 мм при $\alpha_0 = 3,06$; б — образцы со сферическими порами диаметром 6 мм при $\alpha_0 = 2,57$; в — образцы со сферическими порами диаметром 4 мм при $\alpha_0 = 2,3$

Полученные диаграммы деформирования ячеистого алюминия на основе литейного сплава АК7 независимо от начальной пористости и размера пор (см. рис. 4, а–в) практически соответствуют идеализированной диаграмме деформирования (рис. 4, з). Однако большинство исследованных высокопористых алюминиевых сплавов имеют диаграммы деформирования с упрочнением [12, 14, 23–29], что

нежелательно для эффективного ослабления (изоляции) ударных воздействий. Причем явление упрочнения наблюдается в широком диапазоне значений начальной пористости α_0 : от 4,4 до 7,2 [26], от 5,5 до 6 [27], от 4,6 до 11,5 [28], от 8,2 до 23 [29].

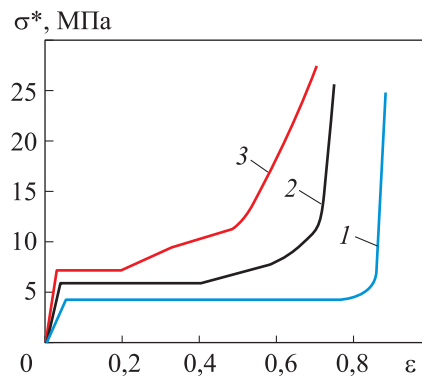
Механические свойства сотовых конструкций из алюминиевых сплавов. Полученные при испытаниях на сжатие диаграммы деформирования образцов сотовых конструкций из алюминиевых сплавов близки к идеализированной диаграмме деформирования высокопористых металлов (рис. 5) [30, 31]. Однако по мере увеличения начальной средней плотности образцов на диаграмме деформирования появляется участок упрочнения (см. рис. 5).

Рис. 5. Диаграммы деформирования образцов сотовых конструкций из алюминиевых сплавов:

1 — $\rho_0 = 402 \text{ кг/м}^3$ ($\alpha_0 = 6,72$);

2 — $\rho_0 = 531 \text{ кг/м}^3$ ($\alpha_0 = 5,08$);

3 — $\rho_0 = 714 \text{ кг/м}^3$ ($\alpha_0 = 3,78$)



Следует отметить, что в данной работе приведены диаграммы деформирования сотовых конструкций из алюминиевых сплавов, которые разработаны в МГТУ им. Н.Э. Баумана, а выполнены в условиях промышленного производства. Изготовление сотовых конструкций было связано с гофрированием листов алюминиевых сплавов толщиной h от 0,1 до 0,5 мм путем прессования, а ячейка гофрированной панели в форме половины шестиугольника имела размеры $l_1 = l_2 = l$ от 2 до 6 мм и $\theta = 30^\circ$ (рис. 6, а). Гофрированные панели склеивались (рис. 6, б) в печи при температуре 80°C и давлении P до 10 МПа в сотовый блок кубической формы (рис. 7).

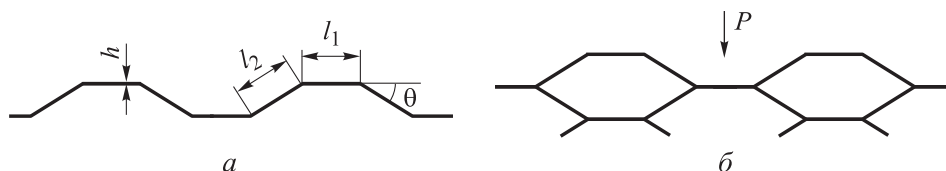


Рис. 6. Геометрия гофрированного алюминиевого листа (а), склеивание гофрированных листов и направление статического нагружения при испытаниях (б)

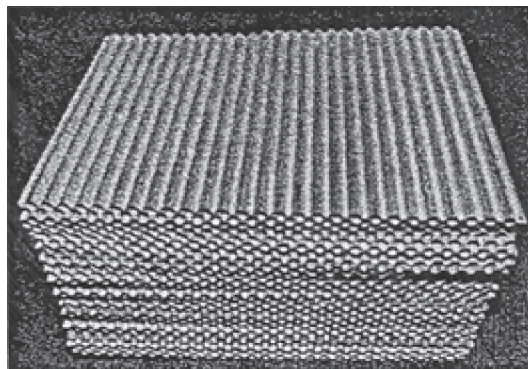


Рис. 7. Сотовый блок панелей в состоянии поставки

При изготовлении из сотовых блоков цилиндрических образцов, предназначенных для механических испытаний, применялась механическая обработка, а сотовый блок предварительно в специальной емкости заполнялся или полиэтиленгликолем марки ПЭГ-115, широко применяемым в авиационной промышленности при изготовлении сотовых наполнителей, или расплавленным стеарином. После механической обработки полиэтиленгликоль удалялся из образцов в ванне с водой при комнатной температуре, а стеарин выплавлялся. Начальная средняя плотность ρ_0 получаемых образцов с высокой точностью соответствовала расчетной величине, получаемой по формуле [32, 33]

$$\rho_0 = \rho \frac{l_1 / l_2 + 2}{2 \cos \theta (l_1 / l_2 + \sin \theta)} \frac{h}{l_2}.$$

Когда $l_1 = l_2 = l$ и $\theta = 30^\circ$, имеем

$$\rho_0 = 2\rho h / (\sqrt{3}l),$$

где ρ — плотность материала листа.

Во многих работах исследователей диаграммы деформирования образцов сотовых конструкций из алюминиевых сплавов близки к идеализированной диаграмме деформирования высокопористых металлов. Подобные результаты получены для конструкций с начальной пористостью $\alpha_0 = 3,0$ [34], $\alpha_0 = 10,4$ [35], от 21 до 54 [36], $\alpha_0 = 70,5$ [37].

Диаграммы деформирования и характеристики амортизаторов. Сравнение идеализированной диаграммы деформирования (см. рис. 4, *з*) с силовыми характеристиками амортизаторов (рис. 8) [38] позволило сделать вывод, что упругая стадия деформирования I идеализированной диаграммы уплотнения ячеистого алюминия и сотовой конструкции (см. рис. 4, *з*) соответствует амортизатору-аналогу с постоянной жесткостью без начальной затяжки (рис. 8, *а*), уплотнитель-

но-пластическая стадия II — идеальному амортизатору (рис. 8, б), а пластическая стадия III — амортизатору-аналогу с «жесткой» нелинейной характеристикой (рис. 8, в) [38]. Среди амортизаторов лучшим считается тот, который способен воспринимать насколько возможно большую энергию удара при минимальном значении приложенной силы. В этом случае оптимальной характеристикой считается та, при которой для любого удара (при различных скоростях удара) сжатие амортизатора равно его полному ходу, а усилие сжатия $F = \text{const}$.

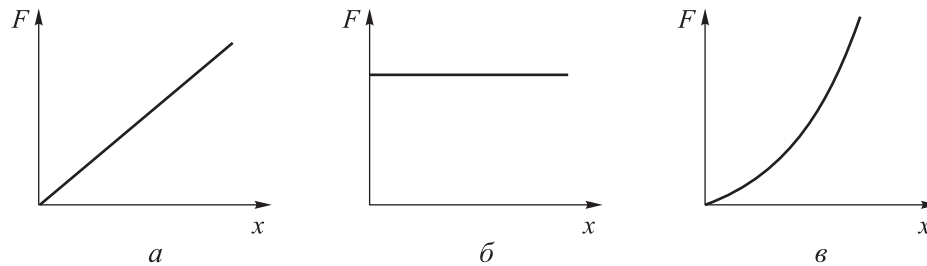


Рис. 8. Типичные силовые характеристики амортизатора удара:
 а — амортизатор с постоянной жесткостью без начальной затяжки; б — идеальный амортизатор; в — амортизатор с «жесткой» нелинейной характеристикой

Амортизирующие характеристики высокопористых металлов и сотовых конструкций можно рассчитать на основе известных диаграмм деформирования в виде удельной энергии поглощения удара A и эффективной энергии поглощения удара E , которые вычисляются следующим образом [17–19, 23, 25]:

$$A = \int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma d\varepsilon;$$

$$E = \int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma d\varepsilon / (\sigma_{\max} \varepsilon_{\max}),$$

где σ_{\max} — максимальное напряжение, возникающее на отрезке $[0, \varepsilon_{\max}]$; ε_{\max} — максимальная деформация.

Эффективная энергия поглощения удара аналогична коэффициенту полноты поглощения удара, который применяется при расчете амортизаторов удара [38]:

$$\Pi = \int_0^{x_{\max}} F dx / (F_{\max} x_{\max}),$$

где Π представляет собой отношение фактической энергии, воспринятой амортизатором, к энергии, воспринятой идеальным амортиза-

тором при максимальной силе F_{\max} и максимальном перемещении x_{\max} .

Эффективную энергию поглощения удара E удобно применять для сравнительной оценки амортизирующих свойств пористых металлов и сотовых конструкций. Можно показать, что для линейного участка диаграммы деформирования эффективная энергия $E = 0,5$, а для участка с постоянным напряжением — $E = 1$. Идеальные амортизирующие свойства соответствуют значению $E = 1$.

Примером наиболее полной системы расчета амортизирующих характеристик высокопористых алюминиевых сплавов и сотовых конструкций могут служить приведенные на рис. 9 идеализированные диаграммы деформирования высокопористого алюминиевого сплава или сотовой конструкции без упрочнения и с упрочнением (рис. 9, а), соответствующие им удельные энергии поглощения удара (рис. 9, б) и эффективные энергии поглощения удара (рис. 9, в).

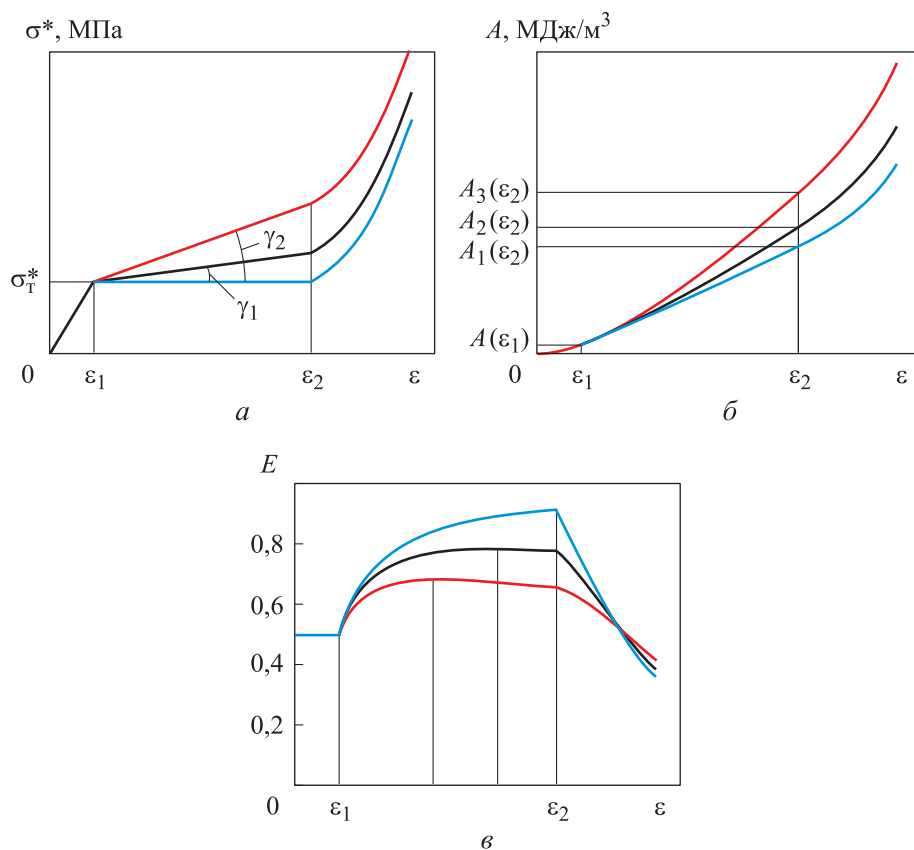


Рис. 9. Идеализированная диаграмма деформирования высокопористого алюминиевого сплава или сотовой конструкции (а) и соответствующие ей удельная энергия поглощения удара (б) и эффективная энергия поглощения удара (в)

Идеализированная диаграмма без упрочнения и с упрочнением имеет характерные стадии: линейная упругая стадия от 0 до ε_1 , обусловленная упругими деформациями, уплотнительно-пластическая стадия от ε_1 до ε_2 в случае без упрочнения соответствует линейной зависимости удельной энергии поглощения удара (см. рис. 9, б) и пластическая стадия, начинающаяся от ε_2 . Участок графика эффективной энергии поглощения удара без упрочнения (см. рис. 9, в), соответствующий уплотнительно-пластической стадии, имеет вид гиперболы, асимптотически стремящейся к единице, т. е. к идеальному амортизатору. Таким образом, материал, имеющий более выраженную и протяженную уплотнительно-пластическую стадию без упрочнения, в большей мере соответствует идеальному амортизатору.

На идеализированных диаграммах с упрочнением приведены модели с разной способностью к упрочнению, которая характеризуется углами γ_1 и γ_2 . В отличие от идеализированной диаграммы деформирования без упрочнения, где максимум эффективной энергии поглощения удара E достигается только в конце уплотнительно-пластической стадии, в диаграммах с упрочнением он достигается раньше. Чем больше значение угла, например $\gamma_2 > \gamma_1$, тем раньше достигается максимум, и такой однократный амортизатор меньше соответствует идеальному.

Заключение. Некоторые высокопористые алюминиевые сплавы и сотовые конструкции из алюминиевых сплавов имеют диаграммы деформирования, близкие к идеализированной без упрочнения в диапазоне начальной средней плотности от 190 до 2250 кг/м³. Однако некоторые высокопористые алюминиевые сплавы и сотовые конструкции имеют диаграмму деформирования с упрочнением, что ухудшает их амортизирующие характеристики. Вид диаграммы деформирования зависит не только от начальной пористости, но и от материала матрицы, структуры и формы пор.

Представленные результаты можно использовать при выборе высокопористых алюминиевых сплавов и сотовых конструкций для применения в качестве однократных амортизаторов удара в ПУ КА. Эффективная энергия поглощения удара E может служить дополнительным критерием для принятия решений при конструировании ПУ.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00701-а).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Петров Ю.А., Макаров В.П., Колобов А.Ю., Алешин В.Ф. Посадочные устройства космических аппаратов (КА) на основе пенопластов и сотоблоков. *Наука и образование. Электронный научный журнал МГТУ им. Н.Э. Баумана,*

- 2010, № 4. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/141542.html> (дата обращения 11.11.2020).
- [2] Глушко В.П., ред. *Космонавтика. Энциклопедия*. Москва, Сов. энциклопедия, 1985, 528 с.
- [3] Попов Е.И. *Спускаемые аппараты*. Москва, Знание, 1985, 64 с.
- [4] *Technical Report 32-1246 Surveyor V Mission Report. Part I. Mission Description and Performance*. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1968. URL: https://www.jpl.nasa.gov/sites/default/files/sic/surveyor/Surveyor_V_NASA-TechnicalReport32-1246_Part-1.pdf (дата обращения 03.05.2021).
- [5] *Surveyor Program-Results. NASA SP-184*. Scientific and Technical Information Division. Office of technology utilization National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., 1969, 425 p. URL: <https://www.hq.nasa.gov/alsj/NASA-SP-184.pdf> (дата обращения 03.05.2021).
- [6] *Apollo 11 Preliminary Science Report. NASA SP-214*. Scientific and Technical Information Division. Office of Technology Utilization National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., 1969, 205 p. URL: <https://www.hq.nasa.gov/alsj/a11/as11psr.pdf> (дата обращения 03.05.2021).
- [7] *Apollo operations handbook. Lunar module LM 10 and subsequent. Vol. 1 Subsystems data. LMA790-3-LM 10 and Subsequent*. The National Aeronautics and Space Administration, 1971. URL: <https://www.hq.nasa.gov/alsj/LM10HandbookVol1.pdf> (дата обращения 03.05.2021).
- [8] Фортов В.Е., Альтшулер Л.В., Трунин Р.Ф., Фунтиков А.И., ред. *Ударные волны и экстремальные состояния вещества*. Москва, Наука, 2000, 425 с.
- [9] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. Москва, Наука, 1966, 686 с.
- [10] Альтман М.Б., Борок Б.А., Меркулов В.А. и др. Литые заготовки из пенистого алюминия. В кн.: И.Н. Фридляндер, ред. *Алюминиевые сплавы*. Москва, Оборонгиз, 1963, вып. 1, с. 41–49.
- [11] *Применение пенообразного алюминия в космическом кораблестроении*. Пер. с англ. 64/13628. Москва, ГПНТБ, 1964, 9 с.
- [12] Сионоя С. *Пористый алюминий и его применение*. Пер. с япон. 74/11416-B. Москва, ГПНТБ, 1973, 11 с.
- [13] Preface. *Proc. 1st Int. Conf. of Met. Foams and Porous Met. Struct. Bremen (Germany), 14–16 June 1999 (MetFoam '99)*. Bremen, 1999, pp. 1–5.
- [14] Гусаров А.П., Жариков А.В., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Селиванов В.В. Экспериментальная оценка определяющих уравнений высокопористых металлов. *Сб. научн. тр. XIV Междунар. симп. «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени профессора А.Г. Горикова. Ярополец, 18–22 февраля 2008 г.* Москва, Изд-во МАИ, 2008, т. 2, с. 72–83.
- [15] Ashby M.F., Tianjian L. Metal foams: a survey. *Sci. of China. Ser. B*, 2003, vol. 46, no. 6, pp. 522–532.
- [16] Öchner A., Kuhn G., Gracio G. Investigation of cellular solids under biaxial stress strain. *Exp. Mech.*, 2005, vol. 45, no. 4, pp. 325–330.
- [17] Гусаров А.П., Жариков А.В., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Селиванов В.В., Сообщиков А.Н. Механические и амортизирующие свойства высокопористого ячеистого алюминия. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2009, № 1 (74), с. 58–66.
- [18] Гусаров А.П., Жариков А.В., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Селиванов В.В., Сообщиков А.Н. О механических и амортизирующих

- свойствах ячеистого алюминия при сжатии и вторичном нагружении. *Сб. научн. тр. XV Междунар. симп. «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени профессора А.Г. Горшкова. Ярополец, 16–20 февраля 2009 г.* Москва. Типография «ПАРАДИЗ», 2009, т. 2, с. 84–93.
- [19] Wei P., Liu L. Influence of density on compressive properties and energy absorption of foamed aluminium alloy. *J. of Wuhan Univ. of Techn. Mater. Sci.*, 2007, vol. 22, no. 2, pp. 225–228.
- [20] Zhao Y., Ma Ch., Xin D., Sun M. Dynamic mechanical properties of closed-cell aluminum foams with uniform and graded densities. *Journal of Material Research*, 2020, vol. 35, no. 19, pp. 2575–2586. <https://doi.org/10.1557/jmr.2020.157>
- [21] Sun Yongle, Li Q.M. Dynamic compressive behaviour of cellular materials: A review of phenomenon, mechanism and modelling. *Int. J. of Imp. Engng.*, 2018, vol. 112, pp. 74–115.
- [22] Shen J., Lu G., Ruan D. Compressive behaviour of closed-cell aluminium foams at high strain rates. *Composites Part B: Engineering*, 2010, vol. 41, no. 8, pp. 678–685.
- [23] Thornton P.H., Magee C.L. The deformation of aluminium foams. *Met. Trans. A*, 1975, vol. 6A, no. 6, pp. 1253–1263.
- [24] Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Гусаров А.П. Поведение пористых металлов при уплотнении. *Труды МВТУ № 399. Механика импульсных процессов.* Москва, 1983, с. 29–35.
- [25] Öchner A., Winter W., Kuhn G. Elastic-plastic behaviour of perforation aluminium under tension and compression. *Tech. Mech.*, 2001, vol. 21, no. 2, pp. 101–108.
- [26] Islam M.A., Brown A.D., Hazell P.J., Kader M.A., Escobedo J.P., Saadatfar M., Xu S., Ruan D., Turner M. Mechanical response and dynamic deformation mechanisms of closed-cell aluminium alloy foams under dynamic loading. *Int. J. of Imp. Engng.*, 2018, vol. 114, pp. 111–122.
- [27] Kader M.A., Islam M.A., Hazell P.J., Escobedo J.P., Saadatfar M., Brown A.D., Appleby-Thomas G.J. Modelling and characterization of cell collapse in aluminium foams during dynamic loading. *Int. J. of Imp. Engng.*, 2016, vol. 96, pp. 78–88.
- [28] Langdon G.S., Karagiozova D., Theobald M.D., Nurick G.N., Lu G., Merrett R.P. Fracture of aluminium foam core sacrificial cladding subjected to air-blast loading. *Int. J. of Imp. Engng.*, 2010, vol. 37, pp. 638–651.
- [29] Peroni M., Solomos G., Pizzinato V. Impact behaviour testing of aluminium foam. *Int. J. of Imp. Engng.*, 2013, vol. 53, pp. 74–83.
- [30] Гусаров А.П., Жариков А.В., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Селиванов В.В., Сообщиков А.Н. О механических и амортизирующих свойствах сотовых конструкций из алюминиевых сплавов. *Сб. научн. тр. Всерос. науч. конф. «Современная баллистика и смежные вопросы механики», посвященной 100-летию со дня рождения профессора М.С. Горшкова». Томск, 17–19 ноября 2009 г.* Томск, Изд-во ТГУ, 2010, с. 209–210.
- [31] Гусаров А.П., Жариков А.В., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Селиванов В.В., Сообщиков А.Н. Механические и амортизирующие характеристики сотовых конструкций из алюминиевых сплавов. *Сб. научн. тр. XVI Междунар. симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова. Ярополец, 15–19 февраля 2010 г.* Чебоксары, ГУП «ИПК «Чувашия», 2010, т. 2, с. 153–159.
- [32] Gibson L.J., Ashby M.F., Shajer G.S., Robertson C.I. The mechanics of two-dimensional cellular materials. *Proc. R. Soc. Lond. Pt. A382.* London, 1982, pp. 25–42.

- [33] Gibson L.J., Ashby M.F. The mechanics three-dimensional cellular materials. *Proc. R. Soc. Lond. Pt. A382*. London, 1982, pp. 43–59.
- [34] Baker W.E., Togami T.C., Weydert J.C. Static and dynamic properties of high-density metal honeycombs. *Int. J. of Imp. Engng.*, 1998, vol. 21, no. 3, pp. 149–163.
- [35] Odacı İ.K., Güden M., Kılıçaslan C., Taşdemirci A. The varying densification strain in a multi-layer aluminum corrugate structure: Direct impact testing and layer-wise numerical modelling. *Int. J. of Imp. Engng.*, 2017, vol. 103, pp. 64–75.
- [36] Xu S., Beynon J.H., Ruan D., Yu T.X. Strength enhancement of aluminium honeycombs caused by entrapped air under dynamic out-of-plane compression. *Int. J. of Imp. Engng.*, 2012, vol. 47, pp. 1–13.
- [37] Sun Yongle, Li Q.M. Dynamic compressive behaviour of cellular materials: A review of phenomenon, mechanism and modelling. *Int. J. of Imp. Engng.*, 2018, vol. 112, pp. 74–115.
- [38] Никольский Л.Н., Кеглин Б.Г. *Амортизаторы удара подвижного состава*. Москва, Машиностроение, 1986, 144 с.

Статья поступила в редакцию 20.06.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Марков В.А., Попов Ю.В., Пусев В.И., Селиванов В.В. О применении высокопористых алюминиевых сплавов и сотовых конструкций в посадочных устройствах космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-11-2228>

Марков Владимир Александрович — заведующий лабораторией кафедры «Высокоточные летательные аппараты», МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 250 публикаций в области физики взрыва и удара. e-mail: markovva@bmstu.ru

Попов Юлиан Витальевич — аспирант кафедры «Высокоточные летательные аппараты», МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 60 публикаций в области физики взрыва и удара. e-mail: popovuv@bmstu.ru

Пусев Владимир Иванович — канд. техн. наук, чл.-корр. РАЕН, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты», МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 250 публикаций в области физики взрыва и удара. e-mail: pusevvi@bmstu.ru

Селиванов Виктор Валентинович — д-р техн. наук, профессор, действительный член РАН и РАЕН, заведующий кафедрой «Высокоточные летательные аппараты», МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 300 публикаций в области физики взрыва и удара. e-mail: selivanovvv@bmstu.ru

On the use of highly porous aluminum alloys and cellular structures in the spacecraft landing devices

© V.A. Markov, Yu.V. Popov, V.I. Pusev, V.V. Selivanov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper presents results of studying mechanical properties and shock-absorbing characteristics of the highly porous aluminum alloys and aluminum alloy cellular structures with the initial average density from 190 to 2250 kg/m³. The study is based on data from foreign publications and experimental results obtained by the authors. Diagrams of deformation are provided illustrating characteristic stages of the deformation process and compaction of the highly porous alloys and cellular structures made of the aluminum alloys. Highly porous alloys are identified, which deformation is close to the idealized. Based on the analysis of experimental data, presence of two groups of materials is shown: the first with deformation diagram without hardening at the compaction stage and the second with hardening. Basics for calculating specific and effective impact absorption energy are provided. Analogue shock absorbers are shown for characteristic stages of the deformation diagrams. Introduction of the effective impact absorption energy is proposed as a criterion to compare the shock absorbers with each other. The results obtained could be used in the development of the single shock absorbers.

Keywords: spacecraft, landing device, shock absorber, highly porous aluminum, honeycomb structure

This work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (Project no. 19-08-00701-a).

REFERENCES

- [1] Petrov J.A., Makarov V.P., Kolobov A.Yu., Alyoshin V.F. Posadochnye ustroystva kosmicheskikh apparatov (KA) na osnove penoplastov i sotoblokov [Spacecraft's landing devices on the basis of polyfoams and cellular designs]. *Nauka i obrazovanie. Elektronny nauchny zhurnal MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education of Bauman MSTU*, 2010, no. 4. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/141542.html> (accessed November 11, 2020).
- [2] Glushko V.P., ed. *Kosmonavtika. Entsiklopediya* [Cosmonautics. Encyclopedia]. Moscow, Sov. Encyclopedia Publ., 1985, 528 p.
- [3] Popov E.I. *Spuskaemye apparaty* [Descent vehicles]. Moscow, Znanie Publ., 1985, 64 p.
- [4] *Technical Report 32-1246 Surveyor V Mission Report. Part I. Mission Description and Performance*. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1968. Available at: [https://www.jpl.arizona.edu/sites/default/files/sic/surveyor/Surveyor_V_NASA-TechnicalReport32-1246_Part-1.pdf](https://www.jpl.nasa.gov/sites/default/files/sic/surveyor/Surveyor_V_NASA-TechnicalReport32-1246_Part-1.pdf) (accessed May 3, 2021).
- [5] *Surveyor Program-Results. NASA SP-184*. Scientific and Technical Information Division. Office of Technology Utilization, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., 1969, 425 p. Available at: <https://www.hq.nasa.gov/alsj/NASA-SP-184.pdf> (accessed May 3, 2021).
- [6] *Apollo 11 Preliminary Science Report. NASA SP-214*. Scientific and Technical Information Division. Office of Technology Utilization, National Aeronautics

- and Space Administration, Washington, D.C., 1969, 205 p. Available at: <https://www.hq.nasa.gov/alsj/a11/as11psr.pdf> (accessed May 3, 2021).
- [7] *Apollo operations handbook. Lunar module LM 10 and subsequent. Vol. 1 Subsystems data. LMA790-3-LM 10 and Subsequent*. The National Aeronautics and Space Administration, 1971. Available at: <https://www.hq.nasa.gov/alsj/LM10HandbookVol1.pdf> (accessed May 3, 2021).
- [8] Fortov V.E., Altshuler L.V., Trunin R.F., Funtikov A.I., ed. *Udarnye volny i ekstremalnye sostoyaniya veschestva* [Shock waves and extreme states of matter]. Moscow, Nauka Publ., 2000, 425 p.
- [9] Zeldovich Ya.B., Raizer Yu.P. *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy* [Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena]. Moscow, Nauka Publ., 1966, 686 p.
- [10] Altman M.B., Borok B.A., Merkulov V.A. et al. Litye zagotovki iz penistogo aluminiya [Cast blanks from foamy aluminium]. In: Friedlander I.N., ed. *Alyuminiyevye splavy* [Aluminum alloys]. Moscow, Oborongiz Publ., 1963, no. 1, pp. 41–49.
- [11] *Primenenie penoobraznogo alyuminiya v kosmicheskom korablestroenii* [The use of foam aluminum in space shipbuilding]. Translated from English, 64/13628. Moscow, GPNTB Publ., 1964, 9 p.
- [12] Sionoya S. *Poristy alyuminiy i ego primeneniye* [Porous aluminum and its application]. Translated from Japanese, 74/11416-B. Moscow, GPNTB Publ., 1973, 11 p.
- [13] Preface. *Proc. 1st Int. Conf. of Met. Foams and Porous Met. Struct. Bremen (Germany), 14–16 June 1999 (MetFoam '99)*. Bremen, 1999, P. 1–5.
- [14] Gusarov A.P., Zharikov A.V., Markov V.A., Ovchinnikov A.F., Pusev V.I., Selivanov V.V. Eksperimentalnaya otsenka opredelyayushchikh uravneniy vysokoporistykh metallov [Experimental evaluation of the determining equations for highly porous metals]. In: *Sb. nauchn. trudov XIV Mezhdunarodnogo simpoziuma «Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruktivnykh i sploshnykh sred» imeni professora A.G. Gorshkova* [Collection of scientific works of the Professor A.G. Gorshkov XIV International symposium “Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continuous media”, Yaropolets, February 18–22, 2008]. Moscow, MAI Publ., 2008, vol. 2, pp. 72–83.
- [15] Ashby M.F., Tianjian L. Metal foams: a survey. *Sci. of China*. Ser. B, 2003, vol. 46, no. 6, pp. 522–532.
- [16] Öchner A., Kuhn G., Gracio G. Investigation of cellular solids under biaxial stress strain. *Exp. Mech*, 2005, vol. 45, no. 4, pp. 325–330.
- [17] Gusarov A.P., Zharikov A.V., Markov V.A., Ovchinnikov A.F., Pusev V.I., Selivanov V.V., Soobshchikov A.N. Mekhanicheskie i amortiziruyushchie svoystva vysokoporistogo yacheistogo aluminiya [Mechanical and shock absorbing properties of highly porous cellular aluminum]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2009, no. 1 (74), pp. 58–66.
- [18] Gusarov A.P., Zharikov A.V., Markov V.A., Ovchinnikov A.F., Pusev V.I., Selivanov V.V., Soobshchikov A.N. O mekhanicheskikh i amortiziruyushchikh svoystvakh yacheistogo alyuminiya pri szhatii i vtovichnom nagruzhении [On mechanical and shock absorbing properties of aluminum at compression and secondary loading]. In: *Sb. nauchn. trudov XIV Mezhdunarodnogo simpoziuma «Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruktivnykh i sploshnykh sred» imeni professora A.G. Gorshkova* [Collection of scientific works of the Professor A.G. Gorshkov XIV International symposium “Dynamic

- and technological problems of mechanics of structures and continuous media". Yaropolets, February 16–20, 2009]. Moscow, PARADIZ Tipografiya Publ., 2009, vol. 2, pp. 84–93.
- [19] Wei P., Liu L. Influence of density on compressive properties and energy absorption of foamed aluminium alloy. *J. of Wuhan Univ. of Techn. Mater. Sci.*, 2007, vol. 22, no. 2, pp. 225–228.
- [20] Zhao Y., Ma Ch., Xin D., Sun M. Dynamic mechanical properties of closed-cell aluminum foams with uniform and graded densities. *Journal of Material Research*, 2020, vol. 35, no. 19, pp. 2575–2586. <https://doi.org/10.1557/jmr.2020.157>
- [21] Sun Yongle, Li Q.M. Dynamic compressive behaviour of cellular materials: A review of phenomenon, mechanism and modelling. *Int. J. of Imp. Engng.*, 2018, vol. 112, pp. 74–115.
- [22] Shen J., Lu G., Ruan D. Compressive behaviour of closed-cell aluminium foams at high strain rates. *Composites. Part B: Engineering*, 2010, vol. 41, no. 8, pp. 678–685.
- [23] Thornton P.H., Magee C.L. The deformation of aluminium foams. *Met. Trans. A*, 1975, vol. 6A, no. 6, pp. 1253–1263.
- [24] Ovchinnikov A.F., Pusev V.I., Gusarov A.P. Povedenie poristyykh metallov pri uplotnenii [Porous metals behavior under compression]. *Trudy MVTU No. 399. Mechanics of Pulse Processes*. Moscow, 1983, pp. 29–35.
- [25] Öchner A., Winter W., Kuhn G. Elastic-plastic behaviour of perforation aluminium under tension and compression. *Tech. Mech.*, 2001, vol. 21, no. 2, pp. 101–108.
- [26] Islam M.A., Brown A.D., Hazell P.J., Kader M.A., Escobedo J.P., Saadatfar M., Xu S., Ruan D., Turner M. Mechanical response and dynamic deformation mechanisms of closed-cell aluminium alloy foams under dynamic loading. *Int. J. of Imp. Engng.*, 2018, vol. 114, pp. 111–122.
- [27] Kader M.A., Islam M.A., Hazell P.J., Escobedo J.P., Saadatfar M., Brown A.D., Appleby-Thomas G.J. Modelling and characterization of cell collapse in aluminium foams during dynamic loading. *Int. J. of Imp. Engng.*, 2016, vol. 96, pp. 78–88.
- [28] Langdon G.S., Karagiozova D., Theobald M.D., Nurick G.N., Lu G., Merrett R.P. Fracture of aluminium foam core sacrificial cladding subjected to air-blast loading. *Int. J. of Imp. Engng.*, 2010, vol. 37, pp. 638–651.
- [29] Peroni M., Solomos G., Pizzinato V. Impact behaviour testing of aluminium foam. *Int. J. of Imp. Engng.*, 2013, vol. 53, pp. 74–83.
- [30] Gusarov A.P., Zharikov A.V., Markov V.A., Ovchinnikov A.F., Pusev V.I., Selivanov V.V., Soobshchikov A.N. Mat. O mekhanicheskikh i amortiziruyuschikh svoystvakh sotovykh konstruktsey iz alyuminievykh splavov [On mechanical and shock absorbing properties of cellular structures made of aluminum alloys]. In: *Sb. nauchn. tr. Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Sovremennaya ballistika i smezhnye voprosy mekhaniki», posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora M.S. Gorshkova. Tomsk, 17–19 noyabrya 2009 g.* [Collection of scientific works of the All-Russian scientific conference “Modern ballistics and related questions of mechanics” devoted to Professor M.S. Gorshkov’s 100th birthday. Tomsk, November 17–19, 2009]. Tomsk, TSU Publ., 2010, pp. 209–210.
- [31] Gusarov A.P., Zharikov A.V., Markov V.A., Ovchinnikov A.F., Pusev V.I., Selivanov V.V., Soobshchikov A.N. Mekhanicheskie i amortiziruyushchie kharakteristiki sotovykh konstruktsey iz alyuminievykh splavov [Mechanical and shock absorbing characteristics of cellular structures made of aluminum alloys]. In: *Sb. nauchn. tr. XVI Mezhdunarodnogo simpoziuma «Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruktsey i sploshnykh sred» imeni*

- A.G. Gorshkova, Yaropolets, 15–19 fevralya 2010 g. [Collection of scientific works of the Professor A.G. Gorshkov XVI International symposium “Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continuous media”, Yaropolets, February 15–19, 2020]. Cheboksary, IPK Chuvashia Publ., 2010, vol. 2, pp. 153–159.
- [32] Gibson L.J., Ashby M.F., Shajer G.S., Robertson C.I. The mechanics of two-dimensional cellular materials. *Proc. R. Soc. Lond. Pt. A382*, London, 1982, pp. 25–42.
- [33] Gibson L.J., Ashby M.F. The mechanics of three-dimensional cellular materials. *Proc. R. Soc. Lond. Pt. A382*, London, 1982, pp. 43–59.
- [34] Baker W.E., Togami T.C., Weydert J.C. Static and dynamic properties of high-density metal honeycombs. *Int. J. of Imp. Engng.*, 1998, vol. 21, no. 3, pp. 149–163.
- [35] Odacı İ.K., Güden M., Kılıçaslan C., Taşdemirci A. The varying densification strain in a multi-layer aluminum corrugate structure: Direct impact testing and layer-wise numerical modelling. *Int. J. of Imp. Engng.*, 2017, vol. 103, pp. 64–75.
- [36] Xu S., Beynon J.H., Ruan D., Yu T.X. Strength enhancement of aluminium honeycombs caused by entrapped air under dynamic out-of-plane compression. *Int. J. of Imp. Engng.*, 2012, vol. 47, pp. 1–13.
- [37] Sun Yongle, Li Q.M. Dynamic compressive behaviour of cellular materials: A review of phenomenon, mechanism and modelling. *Int. J. of Imp. Engng.*, 2018, vol. 112, pp. 74–115.
- [38] Nikolsky L.N., Keglın B.G. *Amortizatory udara podvizhnogo sostava* [Rolling stock shock absorbers]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 144 p.

Markov V.A., Head of the Laboratory, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 250 publications in explosion and shock physics. e-mail: markovva@bmstu.ru

Popov Yu.V., post-graduate, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 60 publications in explosion and shock physics. e-mail: popovuv@bmstu.ru

Pusev V.I., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University; Associate Member of RANS; author of more than 250 publications in explosion and shock physics. e-mail: pusevvi@bmstu.ru

Selivanov V.V., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University; Full Member of RARAS and RANS; author of more than 300 publications in explosion and shock physics. e-mail: selivanovvv@bmstu.ru